

明細書

プラズマプロセス装置

技術分野

- 5 本発明は、プラズマプロセス用装置に係わり、特に高性能プラズマプロセスが可能で電力効率が高く、メンテナンス周期が長いプラズマプロセス装置に関する。

背景技術

- 10 近年、半導体や液晶ディスプレイの高性能化と高生産性化を実現するために、これらの製造にはプラズマプロセスが欠かせないものになっている。プラズマの励起方式は様々であるが、半導体や液晶ディスプレイの製造には、主に平行平板型高周波励起プラズマ装置あるいは誘導結合型プラズマ装置が使われている。これらのプラズマ装置は、デバイスに与えるダメージが大きく、高速で高性能なプロセスが困難であるなど、いくつかの本質的な問題を内在している。したがって、半導体や液晶ディスプレイの高性能化、高生産性化に対する要求を満たすことが困難になってきている。

- 15 そこで最近注目されているのが、直流磁場を用いずにマイクロ波電界により高密度プラズマを励起するマイクロ波プラズマ装置である。この種のマイクロ波プラズマ装置としては、均一なマイクロ波を発生するように配列された多数のスロットを有する平面状のアンテナ（スロットアンテナ）から真空容器内にマイクロ波を放射し、このマイクロ波電界により真空容器内のガスを電離してプラズマを
20 励起させる装置（特開平9-63793）が知られている。また、スロットアンテナを真空容器外に設置し、スロットアンテナから放射されたマイクロ波を誘電体隔壁および誘電体シャワープレートを通して真空容器内部に導入してプラズマを励起させる装置（WO98/33362）も知られている。このような手法で
25 励起されたマイクロ波プラズマは、プラズマ密度が高く電子温度が低いため、高速でダメージを一切伴わないプロセスを行うことができる。さらに大面積基板上にも均一なプラズマを励起できるため、半導体基板や液晶ディスプレイ基板の大型化にも容易に対応できる。

しかしながら、これらの従来のマイクロ波プラズマ装置では、プロセス用ガスがプラズマにより解離、結合して生成された物質がマイクロ波の通り道である誘

電体隔壁や誘電体シャワープレート表面に付着するという問題がある。抵抗率が低い膜が付着するとマイクロ波が反射され、抵抗率が高い膜が付着するとマイクロ波が吸収されてしまう。これにより、誘電体隔壁や誘電体シャワープレート表面への膜の付着によりプラズマ励起電力が低下してしまい、プラズマ密度が減少してプラズマの安定性が損なわれる。最悪の場合、プラズマが全く励起できなくなるという状態となってしまう。このような問題を回避するには、付着膜を取り除くためのチャンバクリーニングやメンテナンスを頻繁に行う必要があり、生産性が著しく低下してしまう。

半導体や液晶ディスプレイの製造で欠かせない反応性イオンエッチングでは、プラズマ中のイオンを基板とプラズマとの間に形成されるシース中の電界で数100 eV まで加速して基板表面に照射することにより、異方性エッチングを実現している。イオンを所望のエネルギーまで加速するための直流電圧（自己バイアス電圧）を基板周辺のシースに発生させるために、基板には数100 KHz から数10 MHz 程度の高周波が印加される。プラズマは導体と見なすことができるため、基板に印加された高周波電圧は、基板周辺のシースとチャンバ壁などの接地部周辺のシースとにほぼ分圧される。すなわち、基板に高周波を印加すると、基板周辺のシースだけでなく接地部周辺のシースにも高周波電圧がかかり、接地部周辺のシースの直流電圧が増加してプラズマ電位が上昇する。プラズマ電位が15～30 V 以上になると、加速されたイオンの入射により接地部表面がスパッタされて汚染が引き起こされる。

基板周辺のシースと接地部周辺のシースとにかかる高周波電圧の比は、これらのシースのインピーダンス比で決まる。接地部周辺のシースのインピーダンスを基板周辺のシースのインピーダンスよりも十分小さくすれば、基板に印加された高周波電圧の大半は基板周辺のシースにかかる。すなわち、プラズマが接する接地部の面積を基板電極の面積より十分大きく（通常4倍以上）とれば、基板に高周波を印加してもプラズマ電位はほとんど上昇せず、スパッタによる汚染の問題を回避することができる。さらに、基板周辺のシースに大きな直流電圧を効率的に発生させることができる。

ところが、従来のマイクロ波プラズマ装置では、基板の対向面が全て誘電体で

覆われているため、プラズマが接する接地部の面積を大きくとることができない。通常、プラズマが接する接地部の面積は基板電極の面積の3倍程度しかとれない。このため、スパッタによる汚染の問題により、反応性イオンエッチングなど基板表面に高いエネルギーのイオンを入射させる必要があるプロセスに適用することが困難であった。

金属薄膜や強誘電体薄膜、高誘電率薄膜など金属を含む薄膜をプラズマCVD (Chemical Vapor Deposition) 法で形成するプロセスでは、金属原子と有機物分子の化合物である有機金属ガスが用いられる。プラズマにより金属原子と有機物分子間の結合のみを選択的に切断すれば不純物汚染のない良好な特性の薄膜を形成できる。しかし、有機物分子が分解されると膜中に不純物である炭素原子が多量に混入して薄膜の特性が著しく劣化してしまう。また、エッチングプロセスでは、プロセス用ガスの解離が進行し過ぎると、被エッチング膜とレジストマスクや下地材料との選択性が悪化し、さらにアスペクト比の大きな微細パターンのエッチングが困難になる。従来のマイクロ波プラズマプロセス装置では、プラズマ密度が高く比較的電子温度が高いマイクロ波入射面付近に、プロセス用ガスが直接導入される。このため、プロセス用ガスの解離が進行し過ぎて、有機金属ガスを用いた薄膜の形成や微細パターンのエッチングでは、良好な結果を得ることができなかった。

マイクロ波をプラズマに入射したとき、電子密度が次式で表されるカットオフ密度 n_c より低ければマイクロ波はプラズマ中を伝搬する。

$$n_c = \epsilon_0 \omega^2 m_0 / e^2$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ω はマイクロ波角周波数、 m_0 は電子の質量、 e は電子の電荷である。一方、電子密度がカットオフ密度より高ければ、マイクロ波はプラズマ表面近傍で反射される。このとき、マイクロ波は侵入長程度（通常数mm～10mm程度）プラズマ中に侵入して、プラズマ中の電子にエネルギーを与えプラズマを維持する。マイクロ波プラズマ励起では、電子密度がカットオフ密度より低いとマイクロ波がチャンバ内に分散するため均一で安定なプラズマを励起することができない。均一で安定なプラズマを励起するには、マイクロ波入射面付近にカットオフ密度より十分電子密度が高いプラズマを励起して、入射したマ

マイクロ波の大半をプラズマ表面近傍で反射させることが不可欠である。電子密度が高く安定なプラズマを励起するには、Ar、Kr、Xeなどの希ガスをプラズマ励起ガスとして用いればよい。希ガスに単原子分子以外のガスを添加すると、ガス分子の解離にマイクロ波のエネルギーが使われるため、電子密度が低下してプラズマの安定性が損なわれる傾向がある。従来のマイクロ波プラズマ装置では、希ガス以外のガスを少量（数％）しか添加することができないため、プロセスの自由度が低く、また高速のプロセスに対応できないという問題があった。

プラズマ表面付近の電子密度がカットオフ密度以上になっていると、プラズマに入射したマイクロ波の大半は表面近傍で反射される。この反射波は、スロットアンテナで受信された後、スロットアンテナとマイクロ波電源との間に接続された整合器で再び反射されてスロットアンテナから放射される。マイクロ波はプラズマ表面近傍と整合器で反射を繰り返しながら、徐々にそのエネルギーをプラズマに与える。すなわち、プラズマ表面近傍と整合器の間は、マイクロ波の共振状態になっている。この部分には高いエネルギー密度のマイクロ波が存在することになり、導波路の金属壁のわずかな導体損やスロットアンテナ内の誘電体のわずかな誘電損により、大きな損失が生じる。従来のマイクロ波プラズマ装置では、これらの損失が大きくプラズマ励起電力効率が低かった。さらに、高密度プラズマを得ようとして大電力のマイクロ波を投入すると、スロットアンテナ表面に形成されたスロット部でアーク放電が生じ、これによりアンテナが破損したり、誘電体隔壁と誘電体シャワープレート間のガス流路で放電が生じたりするという問題があった。

発明の開示

本発明は、上述の問題を解決した改良された有用なプラズマプロセス装置を提供することを目的とする。

本発明のより具体的な目的は、マイクロ波導入部の誘電体シャワープレート表面にプロセス用ガスの解離、結合による膜付着がないため、いかなるプロセス用ガスを用いてもプラズマの安定性が高いプラズマプロセス装置を提供することである。

本発明の他の目的は、チャンバクリーニングやメンテナンスの周期が長いプラ

ズマプロセス装置を提供することである。

本発明の更に他の目的は、基板表面に高いイオンエネルギーを入射させなければならないプロセスにも対応可能なプラズマプロセス用装置を提供することである。

- 5 また、本発明の他の目的は、プロセス用ガスの解離が適度に抑制されるため優れた成膜プロセスやエッチングプロセスが可能で、プラズマ励起効率が高いプラズマプロセス装置を提供することである。

- 10 本発明では上記目的を達成するため、従来のマイクロ波プラズマプロセス用装置のプラズマ拡散部（誘電体シャワープレートと基板との間）に新たなプロセス用ガス放出器（格子状シャワープレートと呼ぶ）を設け、希ガスを主体としたプラズマ励起用ガスとプロセス用ガスを異なる場所から放出できるようにした。また、金属製の格子状シャワープレートを接地することにより、従来のマイクロ波プラズマプロセス用装置では対応できなかった基板表面に高いエネルギーのイオンを入射させなければならないプロセスにも対応可能とした。さらに、マイクロ波導入部の誘電体部の厚さ（誘電体隔壁の厚さ＋誘電体シャワープレートの厚さ）を最適化してプラズマの励起効率を最大化すると同時に、誘電体シャワープレートの厚さおよびスロットアンテナと誘電体隔壁との間隔を最適化して大電力のマイクロ波を投入可能にした。

- 20 本発明のプラズマプロセス装置は、従来のマイクロ波プラズマ用装置の誘電体シャワープレートと基板との間に新たなガス放出手段（格子状シャワープレート）を設け、ガス分子の解離を抑制することが望ましいプロセス用ガスを基板に向かって放出する構成になっている。一方、プロセス用ガスが誘電体シャワープレートの方へ拡散しないように、希ガスを主体としたプラズマ励起用ガスを格子状シャワープレートを挟んで基板と反対側に設置された誘電体シャワープレートから放出させる。マイクロ波の通り道である誘電体シャワープレート表面に膜が付着
- 25 することがなくなるため、チャンバクリーニングやメンテナンス周期が著しく長期化し、常に安定したプラズマが得られるようになる。また、プラズマ密度が高く電子温度が比較的高いマイクロ波入射面付近にはプロセス用ガスがほとんど存在しない状態が形成されるため、プロセス用ガスの解離が適度に抑制されて高性能プロセスが実現される。同時に、格子状シャワープレートから多量のプロセス

用ガスを放出してもマイクロ波入射面付近にカットオフ密度を十分上回る高密度で安定したプラズマを励起できるため、プロセスの自由度が飛躍的に向上し、より高速なプロセスが可能である。

- 接地された金属製格子状シャワープレートがプラズマ中に導入することにより、
- 5 プラズマが接する接地部の面積は大幅に増加する。基板に高周波バイアスを印加した場合、高周波電圧の大半を基板周辺のシースに印加できるようになり、プラズマ電位を増加させずに基板表面に入射するイオンのエネルギーを効率よく増加させることが可能である。従って、基板表面に高いイオンエネルギーを入射させなければならない反応性イオンエッチングなどのプロセスにも十分対応可能である。
- 10 さらに、本発明のプラズマプロセス装置によれば、マイクロ波導入部の誘電体部の厚さ（誘電体隔壁の厚さ＋誘電体シャワープレートの厚さ）を最適化してプラズマの励起効率を最大化すると同時に、誘電体シャワープレートの厚さおよびスロットアンテナと誘電体隔壁との間隔を最適化して大電力のマイクロ波を投入できるため、より安定した高密度プラズマの高効率生成が可能である。金属製格
- 15 子状シャワープレートは、腐食性ガスのプラズマに対する耐性に優れた酸化アルミニウム被膜を有するアルミニウム及びステンレス鋼で構成され、長期間にわたって使用可能である。

図面の簡単な説明

- 図1は、本発明の第1の実施例によるマイクロ波プラズマプロセス装置の断面
- 20 図である。

図2は、図1の装置の格子状シャワープレートを基板側から見た平面図である。

図3は、プラズマ空間中のプラズマ電位分布を示すグラフである。

図4は、タンタルの成膜を行った場合の電子密度の時間変化を示すグラフである。

- 25 図5は、基板に印加する高周波電力の基板表面へのイオン入射エネルギー依存性を示すグラフである。

図6は、接地部表面へのイオン入射エネルギーの基板表面へのイオン入射エネルギー依存性を示すグラフである。

図7は、電子密度の誘電体部の厚さ依存性を示すグラフである。

図8は、ギャップ中で放電が開始するマイクロ波電力密度の誘電体シャワープレート103の厚さ依存性を示すグラフである。

図9は、プロセス空間で放電が開始するマイクロ波電力密度の誘電体シャワープレート103と格子状シャワープレート111との間隔依存性を示すグラフである。

- 5 図10は、スロット部で放電が開始するマイクロ波電力密度のラジアルラインスロットアンテナ110と誘電体シャワープレート103との間隔依存性を示すグラフである。

図11は、本発明の第2の実施例によるマイクロ波プラズマプロセス装置に設けられた多孔質セラミックスで構成された格子状シャワープレート111を基板側から見た平面図である。

- 10 図12は、図11のX I I - X I I 線に沿った断面図である。

図13は、本発明の第3の実施例によるマイクロ波プラズマプロセス装置に設けられたアルミニウムで構成された格子状シャワープレート111を基板側から見た平面図である。

図14は、図13のX I V - X I V 線に沿った断面図である。

- 15 図15は、本発明の第4の実施例によるマイクロ波プラズマプロセス装置の断面図である。

発明を実施するための最良の実施の形態

以下、図面を参照しながら本発明の実施例によるプラズマプロセス装置を説明するが、本発明はこれらの実施例に限定されるものではない。

- 20 (実施例1)

- 図1は、本発明の第1の実施例によるプラズマプロセス装置の側部断面図である。本発明の第1の実施例によるプラズマプロセス装置は、真空容器101、誘電体隔壁102、誘電体シャワープレート103、ギャップ104、プラズマ励起用ガス供給口105、プラズマ励起用ガス導入路106、プラズマ励起用ガス放出孔107、Oリング108、109、ラジアルラインスロットアンテナ110、格子状シャワープレート111、プロセス用ガス供給口112、プロセス用ガス放出孔113、ステージ115及び排気口116を有する。プラズマ処理される基板114はステージ115上に載置される。
- 25

本実施例では、真空容器101はアルミニウムにより形成され、誘電体隔壁1

02および誘電体シャワープレート103は比誘電率8.63の窒化アルミニウムにより形成されている。プラズマ励起用マイクロ波の周波数は、2.45GHzである。基板114は、直径200mmのシリコン基板である。

5 大気中に設置されたラジアルラインスロットアンテナ110から放射されたマイクロ波は、誘電体隔壁102、ギャップ104および誘電体シャワープレート103を通過して真空容器101内部に導入され、真空容器101内のガスを電離してプラズマを生成する。

10 本装置は、プラズマ励起用ガスとプロセス用ガスを異なるシャワープレートから放出できる構造になっている。プラズマ励起用ガスは、プラズマ励起用ガス供給口105から供給され、プラズマ励起用ガス導入路106を通り誘電体シャワープレート103の中央部まで導かれる。その後、ギャップ104において中央部から周辺部へ放射状に流れ、複数のプラズマ励起用ガス放出孔107から真空容器内部に放出される。一方、プロセス用ガスは、プロセス用ガス供給口112から供給され、金属管で構成された格子状シャワープレート111の内部を通り、
15 複数のプロセス用ガス放出孔113から基板114側に放出される。

図2は、格子状シャワープレート111を基板114側から見た平面図である。格子状シャワープレート111は、本管201、枝管202、プロセス用ガス放出孔113、及び格子状シャワープレートガス供給口204を有する。点線で示す円205は基板114に対向する領域である。本実施例では、ガスを基板11
20 4上に均一に放出するため、格子状シャワープレートガス供給口204が2つ設けられている。本管201、枝管202は、それぞれ外径9.53mm(3/8インチ)、6.35mm(1/4インチ)の金属管であり、接続部は溶接してある。枝管202は格子状配列されており、本管201及び枝管202の間には開口部206が形成されている。枝管202には、プロセス用ガスを基板面に斜めに、
25 基板全面にわたってほぼ均一に入射するような位置に多数のガス放出孔113が形成されている。本実施例では、プロセスの基板面内均一性を向上させるためにプロセス用ガスを基板面に斜めに入射させるようにしたが、基板面に垂直に入射させるようにしてもよい。

本実施例では、腐食性ガスプラズマ雰囲気中でも半永久的に使用できるように、

配管の材料として従来用いられていたSUS316L材よりもアルミニウム成分が増量された（4.16%）高濃度アルミニウム含有ステンレス鋼を用いて、この配管を弱酸化性雰囲気で高温（900℃）の処理を行い、配管表面に熱力学的に非常に安定な酸化アルミニウム不動態膜を形成している。酸化アルミニウム不動態膜を形成すると、腐食性の高い塩素ガスやフッ素ガスのプラズマに対しても優れた耐食性を示すことが確認されている。

ラジアルラインスロットアンテナ110、誘電体隔壁102、誘電体シャワープレート103、格子状シャワープレート111、および基板114は、それぞれ平行に配置されている。誘電体シャワープレート103と格子状シャワープレート111との間隔は真空中でのマイクロ波の波長の $1/4$ 倍（30mm）に、誘電体隔壁のアンテナ110側の面と誘電体シャワープレート103の基板114側の面との間の距離はマイクロ波の該当部における波長の $3/4$ 倍（30.7mm、うちギャップ104が0.7mm）に、誘電体シャワープレートの厚さはマイクロ波の該当部における波長の $1/2$ 倍（20mm）に設定されている。さらに、ラジアルラインスロットアンテナと誘電体隔壁との間隔は、マイクロ波の波長の $1/4$ 倍（30mm）に設定されている。

図2に示すような格子状シャワープレート111をチャンバ内に設置すると、プラズマからシャワープレート表面へのイオン入射によりシャワープレート部材がスパッタされて基板表面付近に混入し、汚染の問題が生じる可能性がある。プラズマ中に挿入された物体の表面近傍にはシースが形成され、このシース中の電界によりプラズマ中のイオンが加速されて物体表面に入射する。イオンの入射エネルギーが、材料やイオン種固有のしきい値以上であればスパッタリングが起こり、しきい値以下であればスパッタリングは起こらない。例えば、各種金属表面に Ar^+ イオンを入射させた場合、しきい値は10数eV～30eVとなる。スパッタリングによる汚染を防止するには、格子状シャワープレート111に入射するイオンのエネルギーを10数eV以下に抑えることが望ましい。

プラズマ中の接地された物体表面に入射するイオンのエネルギー（eV）は、シースにかかる電圧、すなわちプラズマ電位を V_p として、 eV_p （ e は電子の電荷）にほぼ等しい。接地された物体の表面が絶縁膜で被覆されている場合も同程度の値

になる。図3は、プラズマ空間中のプラズマ電位の分布を示すグラフである。図3中、a01は図1のマイクロ波プラズマプロセス装置における結果を示し、a02は高周波励起平行平板型プラズマプロセス装置における結果を示している。プラズマ空間の間隔は120mm、ガスはAr、圧力は約67Pa(500mTorr)に統一した。図3において、横軸zは基板に垂直方向のプラズマ空間中の位置であり、マイクロ波プラズマ装置では誘電体シャワープレート103表面を基準($z=0$)とし、平行平板型プラズマ装置では基板と対向した高周波印加電極の表面を基準とした。なお、マイクロ波プラズマ装置では2.45GHzのマイクロ波を誘電体シャワープレート103を通して導入し、平行平板型プラズマ装置では13.56MHzの高周波を高周波印加電極に印加することによりプラズマを生成した。

平行平板型プラズマ装置では、プラズマ電位は33V程度であり、チャンバ内に格子状シャワープレート111を設置するとスパッタリングによる汚染が発生することが明らかである。一方、マイクロ波プラズマ装置では、誘電体シャワープレート103から20mm以上離れると8V以下となり、プラズマ中に格子状シャワープレート111を設置してもスパッタされる恐れはない。半導体製造プロセスに用いられている他のプラズマ装置として、誘導結合プラズマ装置や電子サイクロトロン共鳴プラズマ装置等があるが、何れの装置でもプラズマ電位は通常30V以上になる。このように、マイクロ波プラズマ装置は、他のプラズマ装置と比較してプラズマ電位が圧倒的に低いという特徴がある。これは、プラズマ励起部も含めてプラズマ全体に渡って電子温度が低く抑えられていることに起因している。格子状シャワープレート111をマイクロ波プラズマ装置と組み合わせることにより、スパッタリングによる汚染を発生させることなく初めてその効果を発揮させることが可能になる。

図1のプラズマプロセス装置を用いて、シリコン酸化膜で被われた直径200mmのシリコン基板上にプラズマCVD (Chemical Vapor Deposition) 法によりタンタル薄膜を形成する実験を行った。図4は、誘電体シャワープレート103表面の付着物が完全に取り除かれた状態でタンタルの成膜を開始し、成膜時間の経過とともにプラズマ中の電子密度がどのように変化するかを測定した結果で

ある。曲線 3 0 1 は従来のマイクロ波プラズマ装置の構成、すなわち格子状シャワープレート 1 1 1 を設置せずに、プラズマ励起用ガスとプロセス用ガスを混合して双方とも誘電体シャワープレート 1 0 3 から放出した場合の結果である。曲線 3 0 2 は本発明のマイクロ波プラズマ装置の構成、すなわち、格子状シャワープレート 1 1 1 を設置してプラズマ励起用ガスとプロセス用ガスを分けて放出した場合の結果である。

電子密度の測定は、ウェーハの中心軸上でウェーハから 1 5 mm 離れた地点で行った。プロセス用ガスとしては、液体である T a (O-C₂H₅)₅ を A r キャリアガスによりバブリングしたガスを用いた。プラズマ励起用ガスとしては A r を用いた。プロセス用ガスとプラズマ励起用ガスの流量は、それぞれ 1 5 0 sccm、5 0 0 sccm、真空容器内の圧力は約 8 0 P a (0. 6 Torr) とした。プラズマ励起用マイクロ波の周波数は、2. 4 5 GHz、電力は 1. 1 kW であった。

従来の構成では、成膜時間が 3 分を過ぎると次第に電子密度が低下してプラズマが不安定になり、1 1 分でプラズマが消失した。これは、誘電体シャワープレート 1 0 3 表面に付着したタンタル薄膜が、マイクロ波を反射、吸収したことが原因である。実際に、誘電体シャワープレート 1 0 3 表面に付着した膜を分析した結果、炭素を多量に含むタンタル薄膜が付着していることが明らかになった。タンタル薄膜の平均膜厚は 4. 3 μm であった。

一方、本発明の構成では、2 0 分の成膜を行っても電子密度は全く変化せず、誘電体シャワープレート 1 0 3 の表面へのタンタル薄膜の付着は確認されなかった。従来の構成よりも成膜開始直後に電子密度が若干低いのは、格子状シャワープレート 1 1 1 の存在により、プラズマのウェーハ周辺への拡散が若干遮られるためである。従来の構成では、成膜中にシャワープレート表面にタンタル薄膜が付着してしまうため、成膜後に塩素系ガスプラズマ等を用いたチャンバ内面のクリーニングとメンテナンスを頻繁に行う必要があり不経済で生産性が低かった。しかし、本発明の構成では、クリーニングやメンテナンスがほとんど必要なくなり、生産性が大幅に向上した。

次に、シリコン酸化膜上に形成されたタンタル薄膜の特性を評価した結果について述べる。2 次イオン質量分析装置でタンタル薄膜中の炭素含有量を測定した

ところ、従来の構成では10.5%と非常に多かったが、本発明の構成では0.3%であることが分かった。従来の構成では、有機金属ガスを誘電体シャワープレート103から放出したため、プラズマ入射面付近の高密度で比較的電子温度が高いプラズマによりガス分子が過度に分解して分子量の小さな有機物が発生して膜中に混入した。しかし、本実施例の構成では、有機金属ガスを格子状シャワープレート111から電子温度が低い拡散プラズマ領域に放出したため、タンタル原子と有機物分子間の結合のみが選択的に切れて蒸気圧の高い有機物しか発生しなかったためである。

さらにタンタル薄膜の電気抵抗率を測定したところ、従来の構成では炭素の含有量が多いため $2.25 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ であったが、本発明の構成では $2.1 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ と一桁以上も低く、ほぼ理想的な薄膜が形成されていることが明らかになった。このように、本発明のプラズマプロセス装置を金属薄膜や強誘電体薄膜、高誘電率薄膜のCVDに適用すると、薄膜の特性を大幅に向上させることが可能になる。

次に、マイクロ波プラズマ装置のエッチングプロセスへの適合性について述べる。図5は、エッチングに必要な基板表面へのイオン入射エネルギーを得るのに基板にどれだけ高周波電力を印加すればよいかを示すグラフである。曲線401は、従来のマイクロ波プラズマ装置の構成、すなわち、格子状シャワープレート111が存在しない場合の結果であり、曲線402は、本発明のマイクロ波プラズマ装置の構成、すなわち、接地された格子状シャワープレート111が存在する場合の結果である。プラズマ励起用ガスとしては、Arを用いた。真空容器内の圧力は約4 Pa (30 mTorr)、プラズマ励起用のマイクロ波の周波数は、2.45 GHz、電力は1.1 kWであった。また、基板へ印加した高周波の周波数は2 MHzであった。

図5より、同じ基板表面へのイオン入射エネルギーを得るのに、本発明の構成では従来の1/5程度の高周波電力を印加すれば十分であることが分かる。すなわち、大幅な効率化と高周波電源や整合器の小型化、低コスト化が可能になる。

図6は、エッチングに必要な基板表面へのイオン入射エネルギーを得るのに必要な電力を基板に印加したときに、接地部表面へのイオン入射エネルギーがどう変化するかを示すグラフである。曲線501は、従来のマイクロ波プラズマ装置の構

成、すなわち、格子状シャワープレート 1 1 1 が存在しない場合の結果であり、曲線 5 0 2 は、本発明のマイクロ波プラズマ装置の構成、すなわち、接地された格子状シャワープレートが存在する場合の結果である。条件は図 5 の場合と同じである。

- 5 図 6 より、従来の構成では、接地部表面へのイオン入射エネルギーは基板表面へのイオン入射エネルギーと同程度の非常に高い値であることが分かる。例えば、シリコン酸化膜の反応性イオンエッチングでは、基板表面に 4 0 0 eV 程度のイオンを入射させる必要がある。このイオン入射エネルギーを得るためには基板に 1 6 0 0 W の高周波電力を印加する必要がある、このとき接地部表面へのイオン入射エネルギーは 3 7 0 eV となる。このような高い運動エネルギーを持ったイオンがチャンバ壁や格子状シャワープレートなどの接地部表面に入射すると、壁面がスパッタされて不純物汚染の原因になる。また、スパッタリングにより削られるため、寿命が著しく短い。一方、本発明の構成では、プラズマが接する接地部表面の面積が基板の面積と比較して十分大きいため、接地面へのイオン入射エネルギーは 1 0 eV から 2 0 eV と低い値に抑えられており、接地面がスパッタされることはない。

表 1 は、シリコン基板表面のシリコン酸化膜のエッチングを行ったときの、レジストとシリコン酸化膜のエッチング選択比、セルフアラインコンタクト形成時に不可欠なシリコン窒化膜とシリコン酸化膜のエッチング選択比、および 0. 2 5 μm のシリコン酸化膜コンタクトホールを形成した後にアルミニウム電極を形成して電極と下地のシリコンとのコンタクト抵抗を測定した結果を示す。

表 1

従来の装置と本発明の装置でエッチングを行った場合のエッチング特性の比較

| | 従来の装置を用いた場合 | 本発明の装置を用いた場合 |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|
| レジストのシリコン酸化膜に対するエッチング選択比 | 4. 8 | 1 0. 9 |
| シリコン窒化膜のシリコン酸化膜に対するエッチング選択比 | 1 8 | 3 8 |
| コンタクト径 0. 2 5 μm のコンタクト抵抗 | 3. 7 Ω | 0. 4 8 Ω |

プラズマ励起用ガスには、Arを用いた。プラズマ励起用ガスの流量は320 sccmであった。また、プロセス用ガスには、 $C_4F_8/O_2/Xe$ の混合ガスを用いた。プロセス用ガスの流量は105 sccmであった。真空容器内の圧力は約4 Pa (30 mTorr)であった。プラズマ励起用のマイクロ波の周波数は、2.

5 4.5 GHz、電力は1.1 kWであり、基板へ印加した高周波の周波数は2 MHzであった。基板へ印加した高周波の電力は、基板表面へのイオン入射エネルギーが400 eVになるように設定した。

次世代の超微細高性能半導体デバイスを実現するには、レジストとシリコン酸化膜の選択比は10以上、シリコン窒化膜とシリコン酸化膜の選択比は30以上
10 必要である。従来の構成では、CF系ガスの分解が過度に進行して選択比を低下させる要因となるフッ素ラジカルやフッ素イオンが多量に生成されるため、レジストに対しても、シリコン窒化膜に対しても十分なエッチング選択比を得ることができない。また、チャンバ壁など接地部表面がスパッタされてコンタクトホール底のシリコン表面付近に混入するため、コンタクト抵抗が非常に高くなる。こ
15 のままではデバイスには使えないため、シリコン表面付近のダメージ層を取り除く行程が必要になり、半導体製造コスト増大と生産性低下を招いていた。

一方、本発明の構成では、プロセス用ガスがプラズマ拡散部の電子温度が極めて低い部分に導入されるため、CF系ガスの分解が適度に抑制され、レジストに対してもシリコン窒化膜に対しても十分なエッチング選択比を得ることができる。
20 また、不純物の汚染がないため、コンタクト抵抗も低く抑えられている。

図7は、投入マイクロ波電力を一定にして誘電体部の厚さ（誘電体隔壁102の厚さ+誘電体シャワープレート103の厚さ）を変えたときに、プラズマ中の電子密度がどのように変化するかを測定した結果を示すグラフである。マイクロ波周波数は2.45 GHz、マイクロ波電力は1.8 kWであった。ギャップ104は0.7 mmであった。ガスはAr、圧力は約6.7 Pa (50 mTorr)であった。電子密度は誘電体シャワープレートから22 mm離れた地点で測定した。
25

図7より、プラズマ中の電子密度は、誘電体部の厚さとともに周期的に変化することが分かった。プラズマ励起効率（プラズマ励起に使われた電力/マイクロ波電源が供給した電力）は電子密度に比例する。本実施例では、プラズマ励起効

率は、誘電体部の厚さの変化とともに21%から75%まで周期的に変化した。
この現象は、次のように説明できる。

マイクロ波入射面付近の電子密度はカットオフ密度(2.45GHzにおいて $7.45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$)よりも十分高い(10^{12}cm^{-3} 以上)ため、プラズマ表面に入射したマイクロ波は表面から侵入長(3mm位)程度しかプラズマ中に侵入できず、ほぼ完全に反射される。反射されたマイクロ波はアンテナで受信された後、アンテナとマイクロ波電源間に接続された整合器で反射されて再びアンテナから放射される。すなわち、プラズマ表面近傍と整合器の間は、マイクロ波の共振状態になっている。この部分には高いエネルギー密度のマイクロ波が存在することになり、導波路の金属壁のわずかな導体損やスロットアンテナ内の誘電体のわずかな誘電損により、大きな損失が生じる。この損失がマイクロ波からプラズマに与えられる電力よりも大きい場合には、プラズマ表面近傍と整合器の間のマイクロ波電力密度は、プラズマの状態にあまり依存しない。共振器中のマイクロ波電力密度を一定と仮定すると、誘電体部がアンテナ側の面がマイクロ波電界の定在波の腹の位置になるような厚さの時に誘電体中のマイクロ波電力密度が最大となり、最も効率よくプラズマを励起できる。逆に、誘電体部がアンテナ側の面が定在波の節の位置になるような厚さの時に誘電体中のマイクロ波電力密度が最小となり、プラズマ励起効率は最も低くなる。誘電体部のアンテナ側の面をマイクロ波電界の定在波の腹の位置にするには、誘電体隔壁のアンテナ側の面と誘電体シャワープレート103の基板側の面との間の距離が、該当部の波長の1/4の奇数倍になっていけばよい。誘電体シャワープレート103の基板側の面は、導体と見なせるプラズマの存在によりほぼ短絡面(定在波の節の位置)と見なすことができるためである。図7より、電子密度が最大値をとる誘電体部の厚さは30mmおよび50mmであることが分かる。これらは誘電体隔壁のアンテナ側の面と誘電体シャワープレート103の基板側の面との距離が、それぞれ波長の3/4倍および5/4倍に相当する。

従来の構成では、誘電体部の厚さが機械的強度のみで決定されていたため、プラズマ励起効率が低い場合が多く、また励起効率が装置によってまちまちであった。本発明の構成では、プラズマ励起効率が75%程度と高く、従来の構成の最

大3. 6倍にもなる。即ち、より低消費電力、小型で安価なマイクロ波電源で高密度プラズマを生成することが可能になった。

図8は、誘電体部の厚さを30mmに固定して誘電体シャワープレート103の厚さを変えたときに、ギャップ104中で放電が開始するマイクロ波電力密度を測定した結果を示すグラフである。ギャップ中で放電が開始するマイクロ波電力密度は、誘電体シャワープレート103の厚さとともに周期的に変化することが分かる。ギャップ中で放電するとプロセス空間のプラズマが不安定になるため、放電は絶対に避けなければならない。ギャップ中での放電を防止するには、ギャップがマイクロ波電界の定在波の節の位置になるように誘電体シャワープレート103の厚さを決めればよい。すなわち、誘電体シャワープレート103の厚さが、該当部の波長の $1/2$ の整数倍になっていればよい。図8より、誘電体シャワープレート103の厚さが20mmのときギャップ104中で最も放電しにくく、10mmのとき最も放電しやすいことが分かる。これらは、それぞれ波長の $1/2$ 倍および $1/4$ 倍に相当する。

従来の構成では、シャワープレートの厚さが機械的強度およびガスのコンダクタンスのみで決定されていたため、ギャップ中で放電しやすい場合が多く、プラズマに大電力を投入することが困難であった。本発明の構成では、プラズマに大電力を投入してもギャップ104中で放電することがないため、常に安定な高密度プラズマを励起することが可能である。

図9は、誘電体シャワープレート103と格子状シャワープレート111との間隔を変えたときに、プロセス空間（誘電体シャワープレート103と基板114の間）で放電が開始するマイクロ波電力密度と、基板114周辺の電子密度を測定した結果を示すグラフである。

誘電体シャワープレート103と格子状シャワープレート111との間隔が波長の $1/4$ 倍より短くなると、プロセス空間において急に放電しにくくなることが分かる。これは、次のように説明される。金属で構成された格子状シャワープレート111は、格子間隔をマイクロ波の波長よりも十分短くしておくことマイクロ波の短絡面となる。マイクロ波をチャンバ内に投入した後、プラズマ着火前には、格子状シャワープレート111への入射波と格子状シャワープレート111

の表面付近で反射された反射波が定在波を形成する。誘電体シャワープレート 103 と格子状シャワープレート 111 との間隔が波長の $1/4$ 倍より長い場合には、プラズマ空間中にマイクロ波電界の定在波の腹の部分が存在し、この電界が強い部分で放電が開始する。直後に、そのプラズマを種としてマイクロ波入射面
5 付近に高密度プラズマが生成される。一方、誘電体シャワープレート 103 と格子状シャワープレート 111 との間隔が波長の $1/4$ 倍をより短い場合には、誘電体シャワープレート 103 の表面でマイクロ波電界が最大になるが、間隔が短くなるにつれて電界強度が小さくなり放電しにくくなる。

図 9 より、基板周辺の電子密度は、誘電体シャワープレート 103 と格子状シャワープレート 111 との間隔が増大するにつれて低下することが分かる。マイクロ波入射面付近でプラズマが励起されて基板の方へ拡散するため、マイクロ波入射面から離れるに従って電子密度が低下するためである。低マイクロ波電力で高速プロセスを実現するためには、プロセス空間において放電しやすく、基板周
10 辺の電子密度は高い方がよい。これらの要請を両立させるには、誘電体シャワープレート 103 と格子状シャワープレート 111 との間隔を波長の $1/4$ 倍にすればよいことになる。
15

図 10 は、誘電体部の厚さを 30 mm に固定してラジアルラインスロットアンテナ 110 と誘電体シャワープレート 103 との間隔を変えたときに、アンテナ 110 のスロット部で放電が開始するマイクロ波電力密度を測定した結果を示す
20 グラフである。スロット部で放電が開始するマイクロ波電力密度は、アンテナ 110 と誘電体シャワープレート 103 との間隔とともに周期的に変化することが分かる。スロット部で放電するとアンテナ 110 が破損し、またプロセス空間のプラズマが不安定になるため、絶対に避けなければならない。スロット部での放電を防止するには、アンテナ 110 の表面がマイクロ波電界の定在波の節の位置
25 になるようにアンテナ 110 と誘電体シャワープレート 103 との間隔を決めればよい。誘電体シャワープレート 103 のアンテナ側の面でマイクロ波電界の定在波が腹になっているとき、すなわち誘電体隔壁のアンテナ側の面と誘電体シャワープレート 103 の基板側の面との間の距離が該当部の波長の $1/4$ の奇数倍に設定されている場合、アンテナ 110 と誘電体シャワープレート 103 との間

隔が波長の $1/4$ の奇数倍になっていればよい。図10より、アンテナ110と誘電体シャワープレート103との間隔が30mm及び90mmのとき、スロット部で最も放電が起こりにくく、60mmのときに最も放電が起こりやすいことが分かる。30mm、60mmおよび90mmは、それぞれ波長の $1/4$ 、 $2/4$ および $3/4$ 倍に相当する。

従来の構成では、アンテナ110のスロット部で放電しやすい場合が多く、プラズマに大電力を投入することが困難であった。本発明の構成では、プラズマに大電力を投入してもスロット部で放電することがないため、常に安定な高密度プラズマを励起することが可能である。

10 このように、本実施例の装置を用いれば、基板への高効率高周波バイアス印加および高効率マイクロ波プラズマ生成が可能になり、高周波電源やマイクロ波電源の小型化による装置専有面積の縮小、装置の低コスト化を図ることができる。

15 さらに、大電力のマイクロ波を投入しても誘電体隔壁と誘電体シャワープレート103間のギャップやラジアルラインスロットアンテナ110のスロット部で放電することがないため、より高密度で安定したプラズマを生成することが可能になり、高生産性プロセスが実現される。プロセス用ガスの過剰解離が抑制され不純物汚染がないため、従来のプラズマプロセスを革新する高性能プロセスが可能になる。

(実施例2)

20 次に、本発明の第2の実施例によるプラズマプロセス装置について図11及び図12を参照しながら説明する。図11は、本発明の第2の実施例によるプラズマプロセス装置に設けられた格子状シャワープレート600を基板側から見た平面図である。図12は図11のX I I - X I I 線に沿った断面図である。本発明の第2の実施例によるプラズマプロセス装置は、図11に示す格子状シャワープレート600以外は図1に示す本発明の第1の実施例によるプラズマプロセス装置と同様であり、その説明は省略する。

25 図11に示すように、格子状シャワープレート600は、本管601、枝管602、プロセス用ガス放出部603（ハッチング部）、及び格子状シャワープレートガス供給口604よりなる。図12に示すように、枝管602は被膜606を

有する。なお、図11において点線により示す円605は、基板に対向する領域を示している。

本実施例では、本管601は気孔率0.03%のアルミナセラミックスにより形成され、枝管602は気孔率32%の多孔質アルミナセラミックスにより形成されている。枝管602は格子状に配列されており、本管601と枝管602は、セラミックス系の接着剤で接合されている。したがって、本管601と枝管602とにより開口部607が形成されている。多孔質アルミナセラミックスはガスを透過する性質があり、管内の圧力を管外よりも適度に高い圧力にすることによりシャワープレートとして機能する。多孔質アルミナセラミックスをシャワープレートに用いると、上述の第1の実施例のようにガス放出孔を多数設けた場合と比較して、より均一にガスを放出することが可能になる。枝管602の表面のうちガス放出部以外は、ガスが放出されないように被膜606で覆われている。被膜606は、厚さ220 μ m、気孔率0.8%のアルミナセラミックスである。

アルミナセラミックスは腐食性ガスプラズマに対する耐久性に優れており、長寿命のシャワープレートを構成できる。一方、電気伝導性がないため、プラズマが接する接地面を増大させる効果がなく、基板表面に高いエネルギーのイオンを入射させなければならない反応性イオンエッチング等のプロセスには適さない。このため、本実施例の装置は、CVDや酸化、窒化などの薄膜形成やレジストアッシングに使用することが望ましい。

本実施例では格子状シャワープレート600をアルミナセラミックスで構成したが、熱伝導率が高い窒化アルミニウムセラミックスで構成してもよい。また、アルミニウムやステンレスなどの金属を多量に含有する導電性のあるアルミナセラミックスを用いてもよい。この場合には、プラズマが接する接地面を増大させる効果があるため、基板表面に高いエネルギーのイオンを入射させなければならないプロセスにも適用可能になる。

(実施例3)

次に、本発明の第3の実施例によるプラズマプロセス装置について図13及び図14を参照しながら説明する。図13は、本発明の第3の実施例によるプラズマプロセス装置に設けられた格子状シャワープレート700を基板側から見た平

面図である。図14は図13のXIV-XIV線に沿った断面図である。本発明の第3の実施例によるプラズマプロセス装置は、図13に示す格子状シャワープレート700以外は図1に示す本発明の第1の実施例によるプラズマプロセス装置と同様であり、その説明は省略する。

- 5 図12に示す格子状シャワープレート700は、ガス導入路701、プロセス用ガス放出孔702、格子状シャワープレートガス供給口703、格子状シャワープレート本体705、及び格子状シャワープレート蓋706を有する。なお、点線により示す円704は、基板に相当する領域を示している。

- 10 断面が矩形のガス導入路701が縦横に碁盤目状に形成されており、隣り合うガス導入路の間にはプラズマやガスを通過させるための開口部707が形成されている。格子状シャワープレート本体705および格子状シャワープレート蓋706は、マグネシウムを3%含有するアルミニウムで構成されており、両者は電子ビーム溶接により接合されている。格子状シャワープレート本体705および格子状シャワープレート蓋706は、腐食性ガスに対する耐性を向上させるため
15 に、電子ビーム溶接後にフッ素ガス雰囲気中で熱処理が施され、表面にフッ化マグネシウムとフッ化アルミニウムの混合膜が形成されている。

- 本実施例は、上述の第1の実施例と比較して、格子状シャワープレート700の高周波電流が流れるパスの断面積が大きく抵抗率の小さな材料を用いているため、よりプラズマと接地間のインピーダンスを低下させる効果が高い。すなわち、
20 より電力効率が高いプラズマ装置を構成できる。なお、本実施例では、格子状シャワープレート700をアルミニウムで構成したが、ステンレスや高濃度アルミニウム含有ステンレスで構成してもよい。

(実施例4)

- 図15は、本発明の第4の実施例によるプラズマプロセス装置の断面図である。
25 本発明の第4の実施例によるプラズマプロセス装置は、真空容器801、誘電体隔壁802、誘電体シャワープレート803、ギャップ804、シャワープレート固定治具805、プラズマ励起用ガス供給口806、プラズマ励起用ガス放出孔807、マイクロ波導波路808、格子状シャワープレート809、プロセス用ガス供給口810、プロセス用ガス放出孔811、ステージ813、及び排気

口814を有する。プラズマ処理される基板812はステージ813上に載置される。

本実施例では、真空容器801はアルミニウム、誘電体隔壁802は酸化アルミニウム、誘電体シャワープレート803は窒化アルミニウム、シャワープレート固定治具805はアルミニウムで構成されている。格子状シャワープレート809は、上述の第1乃至第3の実施例のいずれか一つと同様な構成とされており、上述の第1の実施例と同様に、酸化不働態処理された高濃度アルミニウム含有ステンレスで形成されている。プラズマ励起用マイクロ波の周波数は2.45GHzである。基板812は液晶ディスプレイ用の角形ガラス基板であり、サイズは550×650mm²である。

マイクロ波導波路808は、紙面に垂直方向に延在する単一モードの矩形導波管であり、下面は誘電体壁、他の部分は金属壁で囲まれている。マイクロ波は、単一のマイクロ波電源で発生され、装置の中央部付近にて導波管により2本のマイクロ波導波路808に分配して供給される。マイクロ波導波路808中を伝搬するマイクロ波の一部は、誘電体隔壁802から漏れ出し、誘電体シャワープレート803を介して真空容器801内に導入され、プラズマを励起する。プラズマが励起されると、プラズマと誘電体シャワープレート803との境界付近に誘電体シャワープレート803の表面に沿って伝搬する表面波が励起される。均一な表面波を励起することにより、大面積で均一なプラズマが得られる。本実施例では2枚の誘電体シャワープレート803が設置されているが、これらの表面を伝搬する表面波が互いに干渉しないように、誘電体シャワープレート803の間は接地されたシャワープレート固定治具805で電氣的に仕切られている。

誘電体シャワープレート803、格子状シャワープレート809、および基板812は、それぞれ平行に配置されている。誘電体シャワープレート803と格子状シャワープレート809との間隔はマイクロ波の波長の1/4倍(30mm)に設定されている。

本実施例のプラズマプロセス装置をバックゲート型のTFT (Thin Film Transistor) 液晶ディスプレイ製造に用いた。適用したプロセスは、CVD法による、1) シリコン窒化膜形成プロセス、2) シリコン窒化膜上への多結晶シリ

コン膜形成プロセス、3) 多結晶シリコン膜上へのn⁺シリコン膜形成プロセス、4) シリコン膜エッチングプロセス、及び5) シリコン表面直接酸化プロセスであった。以下の表2は、これらの各プロセスに使用したガス種と圧力が示されている。

5

表 2

各液晶ディスプレイ製造プロセスとそのプロセス条件

| プロセス | プラズマ励起用ガス | プロセス用ガス | 圧力 |
|---------------------------|--------------|---|-----------------------|
| 1: シリコン窒化膜形成 | Ar (900sccm) | SiH ₄ (50sccm) NH ₃ (70sccm) | 約 67 Pa (500mTorr) |
| 2: 多結晶シリコン膜形成 | Ar (880sccm) | SiH ₄ (60sccm) H ₂ (60sccm) | 約 67 Pa (500mTorr) |
| 3: n ⁺ シリコン膜形成 | Ar (900sccm) | SiH ₄ (60sccm) PH ₃ (20sccm) | 約 67 Pa (500mTorr) |
| 4: シリコン膜エッチング | Ar (820sccm) | SF ₆ (250sccm) HCl (50sccm) | 約 27 Pa (200mTorr) |
| 5: シリコン表面直接酸化 | He (660sccm) | O ₂ (90sccm) | 約 67 Pa (500mTorr) |

10 半導体でも液晶ディスプレイでも基板が大型化される傾向にある。大型基板を全くトラブルなく高速に搬送することは技術的に困難でコストもかかる。また、基板の大型化に伴い装置も大型化し、装置や製造工場（クリーンルーム）の初期投資コスト、ランニングコストが膨大なものになっている。このため、1台の装置で多くのプロセスを連続して行い、極力基板を移動させないで製造を行うことが強く求められている。

15 本実施例では、1) から3) までのプロセスは、基板812を動かすことなくガスを切り替えることにより連続して行うことができる。4) と5) のプロセスも同様である。本実施例のプラズマプロセス装置は、誘電体シャワープレート803と格子状シャワープレート809から放出されるガスを切り替えることにより、1台の装置で成膜、エッチング、酸化、窒化、アッシングなど多数のプラズマプロセスを行えるという特徴があり、このような連続プロセスにも柔軟に対応

できる。

以下の表 3 は、現在液晶ディスプレイ製造に広く用いられている平行平板型プラズマプロセス装置（従来の装置）と本実施例によるプラズマプロセス装置を用いて同じプロセスを行った場合の結果を比較したものである。

5

表 3

従来の装置と本発明の装置のプロセス性能の比較

| プロセス | 従来の装置を用いた場合 | 本発明の装置を用いた場合 |
|---------------------------|--|--|
| 1) シリコン窒化膜形成 | 耐圧：4.2MV/cm 成膜速度：120nm/min | 耐圧：12.4MV/cm 成膜速度：310nm/min |
| 2) シリコン膜形成 | アモルファス(0.2cm ² /V・sec) 成膜速度：78nm/min | 多結晶 (280cm ² /V・sec) 成膜速度：93nm/min |
| 3) n ⁺ シリコン膜形成 | 抵抗率：2.3Ωcm 成膜速度：58nm/min | 抵抗率：0.7Ωcm 成膜速度：85nm/min |
| 4) シリコン膜エッチング | エッチング速度： 280nm/min | エッチング速度： 720nm/min |
| 5) シリコン表面直接酸化 | 酸化膜厚：7nm (酸化時間 3 分) | 酸化膜厚：28nm (酸化時間 3 分) |

10 シリコン窒化膜はゲート絶縁膜や層間絶縁膜として用いられ、高耐圧でリーク電流が小さい膜を高速に成膜することが求められている。本実施例の装置では、成膜表面に入射するイオンのエネルギーが従来の装置の 1 / 3 以下と低く（4～7 eV）、薄膜にイオン照射ダメージを与えることがないため、従来の 3 倍近い耐圧を有する高品質シリコン窒化膜が形成されている。さらに、電子密度が従来の平行平板型プラズマ装置より 1 桁程度高いため（ $>2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ）、成膜速度が速く生産性が飛躍的に向上する。

15 シリコン膜は、TFTの心臓部であるチャネル部に用いられる。トランジスタの電流駆動能力を向上させるために、チャネル移動度が高いシリコン膜を絶縁膜上に堆積させる必要がある。従来の装置では、アモルファス膜しか形成できなかったため移動度が非常に低かった（0.2 cm²/V・sec 程度）。アモルファス膜にレーザーを照射して多結晶化するレーザアニール処理を行うと高移動度の多結晶シ

リコン膜が得られるが、処理に非常に時間がかかり実用的ではない。本発明のマイクロ波プラズマプロセス装置を用いると、250℃という低い基板温度でアニールなしで280 cm²/V·sec 程度の高移動度多結晶シリコン膜がCVD法で堆積できた。また、高速成膜が可能で生産性にも優れ、他に類を見ない画期的な薄膜形成技術である。

n⁺シリコン膜は、TFETのソース、ドレインコンタクト部に用いられ、トランジスタの電流駆動能力を向上させるためにキャリア密度が高く、抵抗率が小さいことが求められる。本発明の装置を用いると、成膜表面に照射するイオンのエネルギーが小さいため膜にダメージを与えることがなく、キャリアの活性化率が向上してより抵抗率の小さな膜が得られた。

表3の4) シリコン膜エッチングプロセス及び5) シリコン直接酸化プロセスは、基板812を装置外部に取り出すことなく同一チャンバで連続して行われた。バックゲート型TFETのソースとドレイン間のギャップをエッチングした後、下地のソース、ドレインコンタクト用n⁺シリコン（アモルファスまたはマイクロクリスタル）膜を酸化して絶縁物（SiO₂）に代えてソースとドレイン間を絶縁する行程である。エッチングは高速で行わなければならないが、本実施例の装置を用いるとプラズマ密度が高いためエッチング反応が促進されて従来の倍以上のエッチング速度が得られた。

ソースとドレイン間の絶縁をとるには、n⁺シリコン膜（膜厚15 nm 程度）の内部まで完全に酸化する必要がある。このとき、基板温度は350℃程度以下でなければならない。従来の装置で基板温度300℃の低温プラズマ酸化を行うと、3分で7 nm 程度の深さまでしか酸化が進まない。このため、膜全体を酸化することができず、ソースとドレイン間の絶縁はとれない。一方、本実施例の装置では、基板温度300℃において3分の酸化で28 nm 以上の深さまで酸化が進行するため、n⁺シリコン膜全体を酸化してソースとドレイン間を完全に絶縁することが可能である。これは、電子密度が高いため酸化種である酸素ラジカルが多量に生成され、かつ基板表面への多量のイオン照射により酸素ラジカルの酸化膜中の拡散が促進されるためである。

本発明は具体的に開示された上述の実施例に限定されるものではなく、本発明

の範囲を逸脱すること無く様々な改良例及び変形例がなされるであろう。

5

10

15

20

25

請求の範囲

1. 内部が減圧可能な容器（１０１）と、該容器内にガスを供給するガス供給システムと、該容器内に供給されたガスを排気するとともに該容器内を減圧するための排気システムとを有し、該容器（１０１）を構成する壁の一部はマイクロ波を実質的に損失なく透過する材料からなる平板状の誘電体板（１０２）であり、該誘電体板と該容器内に励起されたプラズマの間にはマイクロ波を実質的に損失なく透過する材料からなる平板状の誘電体シャワープレート（１０３）を有し、該誘電体シャワープレートには複数のガス放出孔（１０７）が形成されており、該ガス供給システムにより供給されたガスのうち少なくとも一部は該誘電体板（１０２）と該誘電体シャワープレート（１０３）との間の隙間（１０４）を
5 通って該複数のガス放出孔（１０７）から放出されるように構成されており、該誘電体板（１０２）を挟んで該容器（１０１）の外側には該誘電体板を通してプラズマ励起用のマイクロ波を供給するための平板状のスロットアンテナ（１１０）
10 を有し、該容器の内側には非処理基体（１１４）を保持する電極（１１５）が設けられ、該非処理基体（１１４）に対して処理を行うプラズマプロセス装置であって、

- 該誘電体シャワープレート（１０３）と該非処理基体（１１４）との間に、該誘電体シャワープレートから放出されるガスとは異なる組成のガスを該非処理基
20 体側に放出する格子状シャワープレート（１１１；６００；７００）を有し、該誘電体シャワープレート（１０３）から放出されたガスのうち少なくとも一部は該格子状シャワープレートの開口部（２０６；６０７；７０７）を
通って該処理基体側に流れるように構成されていることを特徴とするプラズマプロセス装置。

- 25 2. 請求の範囲第１項記載のプラズマプロセス装置であって、前記格子状シャワープレート（１１１；６００）は金属管で構成され、該金属管の前記非処理基体側には複数のガス放出孔（２０３；６０３）が設けられ、且つ該金属管は接地されていることを特徴とするプラズマプロセス装置。

3. 請求の範囲第2項記載のプラズマプロセス装置であって、前記金属管はアルミニウムを含んだステンレスで構成され、表面は酸化アルミニウムを主体とする不動態膜で被覆されていることを特徴とするプラズマプロセス装置。

5 4. 請求の範囲第1項記載のプラズマプロセス装置であって、
前記誘電体シャワープレート（103）と前記格子状シャワープレート（111；600；700）とは実質的に互いに平行に配置されており、それらの間隔が前記マイクロ波の真空中での波長の $1/4$ 倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

10

5. 請求の範囲第1項乃至第4項のうちいずれか一項記載のプラズマプロセス装置であって、前記誘電体板（102）と前記誘電体シャワープレート（103）は実質的に平行に配置されており、前記誘電体板（102）の前記スロットアンテナ側の面と前記誘電体シャワープレート（103）の前記非処理基体側の面との間の距離が、前記マイクロ波の該当部における波長の $1/4$ の奇数倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

15

6. 請求の範囲第5項記載のプラズマプロセス装置であって、前記スロットアンテナ（110）と前記誘電体板（102）は実質的に互いに平行に配置されており、それらの間隔が前記マイクロ波の該当部における波長の $1/4$ の奇数倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

20

7. 請求の範囲第1項乃至第4項のうちいずれか一項記載のプラズマプロセス装置であって、前記誘電体シャワープレート（103）の厚さが、前記マイクロ波の該当部における波長の $1/2$ の整数倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

25

8. 請求の範囲第7項記載のプラズマプロセス装置であって、前記スロットアンテナ（110）と前記誘電体板（102）は実質的に互いに平行に配置され

ており、それらの間隔が前記マイクロ波の該当部における波長の $1/4$ の奇数倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

9. 内部が減圧可能な容器（801）と、該容器内にガスを供給するガス供給システムと、該容器内に供給されたガスを排気するとともに該容器内を減圧するための排気システムとを有し、該容器（801）を構成する壁の一部はマイクロ波を実質的に損失なく透過する材料からなる平板状の誘電体板（802）であり、該容器の該誘電体板以外の壁の少なくとも一部は接地された金属壁であり、該誘電体板（802）および該金属壁と該容器内に励起されたプラズマの間にはマイクロ波を実質的に損失なく透過する材料からなる平板状の誘電体シャワープレート（803）を有し、該誘電体シャワープレートには複数のガス放出孔（807）が形成されており、該ガス供給システムにより供給されたガスのうち少なくとも一部は該金属壁と該誘電体シャワープレート（803）との間の隙間（804）を通過して該複数のガス放出孔（807）から放出されるように構成されており、該誘電体板（802）挟んで該容器（801）の外側には壁の一部が該誘電体板（802）で構成された単一モードの導波管（808）を有し、該容器の内側には非処理基体（812）を保持する電極（813）を設け、該非処理基体に対して処理を行うプラズマプロセス装置において、

該誘電体シャワープレート（803）と該非処理基体（812）との間には、該誘電体シャワープレートから放出されるガスとは異なる組成のガスを該非処理基体側に放出する格子状シャワープレート（809）が設けられ、該誘電体シャワープレート（803）から放出されたガスのうち少なくとも一部は該格子状シャワープレート（809）の開口部を通過して該処理基体側に流れるように構成されていることを特徴とするプラズマプロセス装置。

25

10. 請求の範囲第9項記載のプラズマプロセス装置であって、前記格子状シャワープレート（809）は金属管で構成され、該金属管の前記非処理基体側の面には複数のガス放出孔（811）が設けられ、該金属管は接地されていることを特徴とするプラズマプロセス装置。

1 1. 請求の範囲第10項記載のプラズマプロセス装置であって、前記金属管はアルミニウムを含んだステンレスで構成され、表面は酸化アルミニウムを主体とする不働態膜で被覆されていることを特徴とするプラズマプロセス装置。

- 5 1 2. 請求の範囲第9項乃至第11項のうちいずれか一項記載のプラズマプロセス装置であって、前記誘電体シャワープレート（803）と前記格子状シャワープレート（809）は実質的に互いに平行に配置されており、それらの間隔が前記マイクロ波の真空中での波長の $1/4$ 倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

10

- 1 3. 内部が減圧可能な容器（101）と、該容器内にガスを供給するガス供給システムと、該容器内に供給されたガスを排気するとともに該容器内を減圧するための排気システムとを有し、該容器を構成する壁の一部はマイクロ波を実質的に損失なく透過する材料からなる平板状の誘電体板（102）であり、該誘電体板と該容器内に励起されたプラズマの間にはマイクロ波を実質的に損失なく透過する材料からなる平板状の誘電体シャワープレート（103）を有し、該誘電体シャワープレートには複数のガス放出孔（107）が形成されており、該ガス供給システムにより供給されたガスのうち少なくとも一部は該誘電体板（102）と該誘電体シャワープレート（103）との間の隙間（104）を通過して該複数のガス放出孔（107）から放出されるように構成されており、該誘電体板（102）を挟んで該容器（101）の外側には該誘電体板を通してプラズマ励起用のマイクロ波を供給するための平板状のスロットアンテナ（110）を有し、該容器の内側には非処理基体（114）を保持する電極（115）を設け、該非処理基体に対して処理を行うプラズマプロセス装置であって、

- 25 該スロットアンテナ（110）、該誘電体板（102）、該誘電体シャワープレート（103）はそれぞれ実質的に互いに平行に配置されており、該誘電体板（102）の該スロットアンテナ側の面と該誘電体シャワープレート（103）の該非処理基体側の面との間の距離が、該マイクロ波の該当部における波長の $1/4$ の奇数倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

14. 請求の範囲第13項記載のプラズマプロセス装置であって、前記誘電体シャワープレート(103)の厚さが、前記マイクロ波の該当部における波長の $1/2$ の整数倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

- 5 15. 請求の範囲第13項又は第14項記載のプラズマプロセス装置であって、前記スロットアンテナ(110)と前記誘電体板(102)との間隔が、前記マイクロ波の該当部における波長の $1/4$ の奇数倍に実質的に等しいことを特徴とするプラズマプロセス装置。

10

15

20

25

要約書

マイクロ波プラズマプロセス装置において、誘電体シャワープレート103と基板114との間に金属製の格子状シャワープレート111を設け、希ガスを主体としたプラズマ励起用ガスとプロセス用ガスを異なる場所から放出する。格子状シャワープレートを接地することにより、基板114の表面に高いエネルギーのイオンを入射させることができる。マイクロ波導入部における誘電体隔壁102と誘電体の厚さを最適化してプラズマの励起効率を最大化すると同時に、スロットアンテナ110と誘電体隔壁102との間隔および誘電体シャワープレート103の厚さを最適化して大電力のマイクロ波を投入可能とする。